

La carbonatation est un phénomène naturel de vieillissement du béton. Cependant, son apparition, puis, son évolution peuvent avoir des conséquences sur la pérennité des ouvrages. Le LERM* dresse le portrait de ce phénomène.

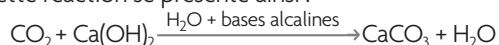
Pathologie

La carbonatation

1 > Qu'est ce que la carbonatation ?

Comme son nom l'indique, la carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments (principalement la portlandite) et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural.

Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant à une diminution du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. D'un point de vue chimique cette réaction se présente ainsi :



La cinétique de carbonatation de la pâte de ciment des bétons, qui évolue suivant une fonction en racine carrée du temps, est dépendante de l'humidité relative.

Elle est maximale pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs extrêmement faibles lorsque les pores sont saturés d'eau, sachant que la diffusion du CO₂ dans l'eau est dix mille fois plus faible que dans l'air. A l'opposé, si un béton est placé dans un environnement très sec, la quantité d'eau présente dans les pores est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone. La cinétique de carbonatation est donc faible à très faible lorsqu'un béton est immergé ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec.

La vitesse de carbonatation obéit à un processus de diffusion du CO₂ atmosphérique à travers la couche de carbonates formée. Elle suit donc une loi linéaire en fonction de la racine carrée du temps :

$$\text{Profondeur de carbonatation} = a \cdot \sqrt{t}$$

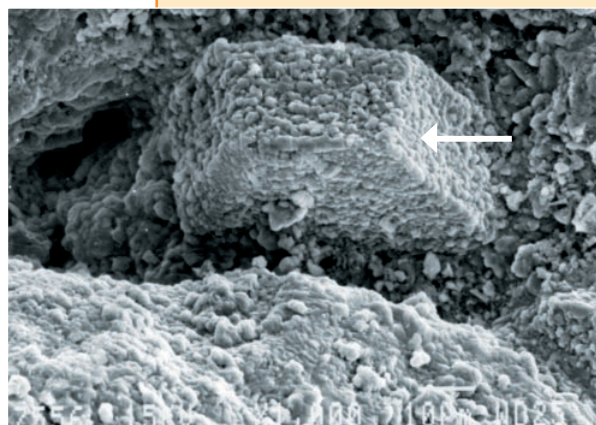
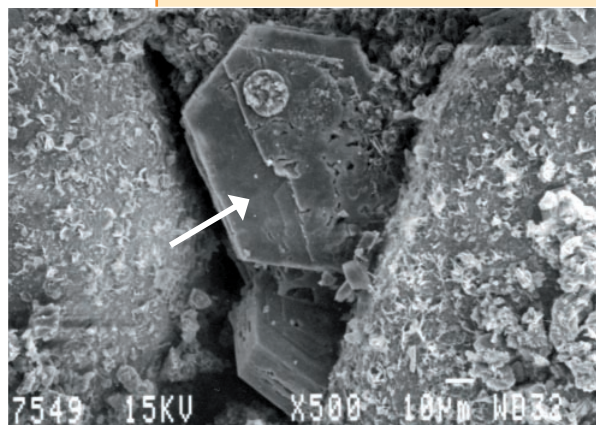
Le coefficient dépend des paramètres de formulation du béton et de ses conditions d'exposition (humidité, température...). De nombreuses lois empiriques ont été proposées pour fixer une valeur de ce coefficient en fonction des conditions d'exposition. Ces lois simples permettent d'établir une prévision approximative d'évolution du phénomène dans le temps.

2 > Quelles peuvent en être les conséquences ?

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert. ▶

Cristal de portlandite non carbonaté
(microscopie électronique à balayage couplée à l'analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie).



Cristal de portlandite en cours de carbonatation.



Fissuration consécutive à la corrosion des armatures.



Epaufrure laissant apparaître les armatures corrodées.

Un phénomène naturel

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral. A l'image de la chaux aérienne, qui sert depuis l'antiquité dans le domaine de la construction et dont le durcissement est assuré par ce phénomène (en absorbant le gaz carbonique atmosphérique). Elle permet en particulier de réaliser des mortiers, des enduits et des badigeons. La chaux aérienne est obtenue à partir de l'extinction de chaux vive, elle-même formée par cuisson d'un calcaire très pur contenant très peu d'argiles. L'utilisation, comme matière première, de calcaires contenant des proportions plus significatives d'argiles (5 à 20 % environ) ou de silices combinables, a conduit à la fabrication de liants hydrauliques. C'est-à-dire faisant prise en présence d'eau : la chaux hydraulique à l'époque romaine et le ciment Portland à la fin du XIXème siècle. Ce dernier constitue maintenant le liant principal des produits de construction contemporains. Tous ces liants, formés à partir de la cuisson d'une matière première de même nature (mais avec une proportion variable d'argiles) ou de silices combinables, renferment des constituants hydratés présentant des caractéristiques minéralogiques proches, et subissent un vieillissement naturel lié au phénomène de carbonatation. C.C.



Bibliographie

• ¹Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM - Durabilité des bétons - Toulouse - Laboratoire Matériaux de Durabilité des Construction - Institut national des sciences appliquées - Université Paul Sabatier à Toulouse - Décembre 1997.

3 > Comment mesurer la carbonatation de façon simple ?

La technique la plus simple à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée (pH < 9) qui reste incolore, de la zone non carbonatée (pH > 9 et allant jusqu'à 13) colorée en violet. Cet essai doit être effectué, à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages.

Il existe d'autres techniques de mesure de la profondeur de carbonatation, plus précises, mais plus lourdes à mettre en œuvre. A l'exemple de la microscopie optique sur lames minces, de la méthode isotopique ou encore de la microscopie électronique à balayage.

Vue d'une fracture fraîche de béton après aspersion d'une solution de phénolphthaléine. En gris : zone carbonatée (exposée au CO₂ atmosphérique). En violet : zone non carbonatée.



4 > Comment s'en prémunir et comment la prévoir ?

Pour des conditions d'exposition données, la cinétique de carbonatation d'un béton est en relation avec sa porosité, et par conséquent avec ses caractéristiques mécaniques, puisque ces deux paramètres sont étroitement liés. Ainsi, pour des bétons présentant des résistances à la compression supérieures ou égales à 50 MPa à 28 jours, comme notamment les BHP, la cinétique de carbonatation est très faible. Dans cette optique, la norme européenne EN 206-1 fixe des paramètres de formulations (dosages en liant équivalent et en additions minérales, rapport Eau efficace/Liant équivalent) et une classe de résistance minimale, pour qu'un béton se comporte de façon durable vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par la carbonatation du béton d'enrobage. Cette norme définit quatre classes d'exposition notée XCl à XC4, dont l'agressivité est fonction de l'humidité et de l'existence de cycles d'humidification/séchage.

Il existe aussi un essai dit de "carbonatation accéléré", qui permet de caractériser le comportement d'une formulation de béton vis-à-vis de ce phénomène naturel. Cet essai a été mis au point dans le cadre du groupe de travail AFPC-AFREM¹ - Durabilité des bétons - "Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité".

Christophe Carde
Directeur technique du LERM

^{*}En tant que laboratoire conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons.